МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINE BUILDING





УДК 620.179
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54

Научная статья

Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций

Н.Л. Вернези ✉
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉vernezin@mail.ru

Аннотация
Введение. Для оценки состояния металла конструкции чаще всего применяют неразрушающие методы. Опасное напряжение определяется по значению предела текучести. У такого подхода есть слабые места. Это, во-первых, вероятностная природа методики (в нормативно-техническую документацию вносится минимальное значение показателя, полученное при лабораторных испытаниях). Во-вторых, следует преодолеть ограничения по числу образцов. В-третьих, разная длительность эксплуатации обусловливает значительную разницу механических характеристик металла, что в известной степени осложняет долгосрочное прогнозирование состояния конструкции. Представленная работа призвана решить эти задачи в рамках исследования новых и давно эксплуатируемых объектов в Ростовской области. Цель научных изысканий — анализ усталостных изменений и определение возможной деградации металла.
Материалы и методы. Механические характеристики исследуемого материала достоверно описываются законом распределения Вейбулла через параметр сдвига (минимально возможное значение характеристики) и параметр формы (рассеивание величины). Для научных изысканий в рамках работы задействовали метод индентирования, основанный на видоизмененном способе оценки твердости по Роквеллу. Конический индентор внедряется в поверхность, затем анализируется реакция металла. Для реализации метода воспользовались аналогово-цифровым преобразователем и ноутбуком. Для корреляционного анализа брали промежуточные характеристики: глубина, максимальная и минимальная скорости, максимальное и минимальное ускорение внедрения конуса. Устанавливалась корреляция с механическими характеристиками, определенными по стандартным испытаниям на растяжение и твердость металла.
Результаты исследования. Изучались объекты с нулевой и многолетней эксплуатацией. Замеры проводили на складе, производстве, стадионе, мосту, во Дворце спорта и на опоре линии электропередач. Из группы новых и отработавших сооружений выбрали по одному для подробной фиксации значений пределов текучести. Так, до начала эксплуатации проанализировали состояние трех металлических ферм склада. Установлено, что наименьше значение предела текучести здесь — 240 МПа, максимальное — 345 МПа. На опорах линии электропередач, бывших в эксплуатации 43 года, самое низкое зафиксированное значение предела текучести — 235 МПа, самое высокое — 384 МПа. Для каждого из шести сооружений приводится минимальное и среднее распределение значений предела текучести металла, даны коэффициенты вариации этого показателя. Зафиксированные значения обобщены в виде таблицы. Рассчитаны средние показатели по всем новым и отработавшим конструкциями. Графически представленные данные иллюстрируют рост коэффициентов вариации предела текучести с увеличением срока эксплуатации.
Обсуждение и заключение. Сравнительный анализ полученных значений предела текучести строительных конструкций приблизительно одного класса прочности позволяет предположить, что влияние времени эксплуатации может как увеличить, так и уменьшить исследуемый показатель. При этом длительная эксплуатация — фактор, увеличивающий среднее значение коэффициента вариации. Для мониторинга прочностных возможностей конструкции целесообразно задействовать неразрушающий метод, выборочно отслеживая механические характеристики элементов до и в процессе эксплуатации

Ключевые слова: неразрушающий контроль, предел текучести металла, металл эксплуатируемой конструкции, деградация металла

Благодарности: автор выражает глубокую признательность Алексею Николаевичу Бескопыльному и Андрею Анатольевичу Веремеенко за помощь в обследовании металлоконструкций.

Для цитирования. Вернези Н.Л. Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):44–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54

Original article

Variation Coefficient of Metal Yield Strength in New and Long-Used Building Structures

Nikas L. Vernezi ✉
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉vernezin@mail.ru

Abstract
Introduction. Non-destructive methods are most often used to assess the condition of the metal structure. Dangerous stress is determined by the value of the yield strength. This approach has weaknesses. This is, firstly, the probabilistic nature of the methodology (the minimum value of the indicator obtained during laboratory tests is entered into the regulatory and technical documentation). Secondly, the limitations on the number of samples should be overcome. Thirdly, the different duration of operation causes a significant difference in the mechanical characteristics of the metal, which to a certain extent complicates the long-term prediction of the condition of the structure. The presented work is designed to solve these problems within the framework of the study of new and long-operated facilities in the Rostov region. The scientific research objective is to analyze fatigue changes and determine possible degradation of the metal.
Materials and Methods. The mechanical characteristics of the material under study were reliably described by the Weibull distribution law through the shear parameter (the minimum possible value of the characteristic) and the shape parameter (magnitude dispersion). For scientific research, the indentation method based on a modified Rockwell hardness estimation method was used as part of the work. A conical indenter was embedded in the surface, then the reaction of the metal was analyzed. To implement the method, an analog-to-digital converter and a laptop were used. For correlation analysis, intermediate characteristics were taken: depth, maximum and minimum velocities, maximum and minimum acceleration of cone insertion. A correlation was established with the mechanical characteristics determined by standard tensile and hardness tests of the metal.
Results. Objects with zero and long-term operation were studied. The measurements were carried out in a warehouse, production site, stadium, bridge, Palace of Sports and on a power line support. From the group of new and used structures, one was selected for a detailed fixation of the values of yield strength. So, before the start of operation, the condition of three metal trusses of the warehouse was analyzed. It was established that the lowest value of the yield strength here was 240 MPa, the maximum was 345 MPa. On the power transmission line poles, which have been in operation for 43 years, the lowest recorded value of the yield strength was 235 MPa, the highest was 384 MPa. For each of the six structures, the minimum and average distribution of the metal yield strength values was given, and the coefficients of variation of this indicator were given. The recorded values were summarized in the form of a table. The average values for all new and used designs were calculated. Graphically presented data illustrate the growth of the coefficients of variation of the yield strength with increasing service life.
Discussion and Conclusion. A comparative analysis of the obtained values of the yield strength of building structures of approximately the same strength class suggests that the influence of operating time can both increase and decrease the studied indicator. At the same time, long-term operation is a factor that increases the average value of the coefficient of variation. To monitor the strength capabilities of the structure, it is advisable to use a non-destructive method, selectively monitoring the mechanical characteristics of the elements before and during operation.

Keywords: non-destructive testing, metal yield strength, metal of the structure in operation, metal degradation

Acknowledgements: the author would like to express his deep appreciation and gratitude to Aleksey Nikolaevich Beskopylny and Andrey Anatolyevich Veremeenko, who took part in the inspection of metal structures together with the author.

For citation. Vernezi NL. Variation Coefficient of Metal Yield Strength in New and Long-Used Building Structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(3):44–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54

Введение. При диагностике, восстановлении, оценке надежности или реконструкции долго эксплуатируемых стальных сооружений возникает необходимость выяснить механические характеристики металла, в том числе показатели его напряжения. Для пластичных материалов, к которым относятся стали металлоконструкций, опасное напряжение определяется по значению предела текучести. Как известно, он имеет вероятностную природу, в нормативно-техническую документацию вносится его минимальное значение, полученное при лабораторных испытаниях ограниченного числа образцов. В большинстве случаев состояние металла конструкции оценивается с помощью неразрушающего контроля.

В процессе эксплуатации механические характеристики (в частности, предел текучести) претерпевают определенные изменения [1]. В исследовании дается сравнительный анализ значений предела текучести металла одного класса прочности в конструкциях до эксплуатации и отработавших десятки лет. Значения предела текучести получены при обследовании неразрушающим методом индентирования.

Во многих источниках описаны изменения металла в процессе эксплуатации конструкции. При этом нет единой точки зрения относительно направления таких трансформаций. Многое зависит от природы материала и длительности эксплуатации. Так, в атомной энергетике металл конструкций почти не меняется за 30–40 лет эксплуатации [2]. В [3] отмечается снижение почти на 40 % циклической прочности сталей 20 и 45 после 15-летнего хранения. Авторы работы [4] подчеркивают, что 40 и более лет эксплуатации магистрального газопровода почти не сказываются на механических характеристиках стали. Вместе с тем в [5] фиксируется снижение пластичности при неизменном значении предела прочности металла газопровода после 37 лет эксплуатации. В [6] указывается на опасность отказов газопровода при длительной эксплуатации из-за деградационных процессов в металле. В [7] описано снижение ударной вязкости после длительной эксплуатации.

Для стали 17Г1С в первые годы эксплуатации газопровода отмечается повышение прочности со снижением пластичности, а в период от 20 до 30 лет эксплуатации наблюдается устойчивое снижение как прочности, так и пластичности [8]. Очевидно, при существенных различиях сроков эксплуатации можно ожидать значительной разницы механических характеристик металла, что осложняет долгосрочное прогнозирование состояния конструкции. Подход, предложенный в данной статье, призван преодолеть это и названные выше ограничения: вероятностную природу показателя и недостаточное число образцов.

Обследованы несколько объектов в Ростовской области с нулевой и многолетней эксплуатацией. В результате собраны и обобщены новые данные по пределу текучести реальных металлоконструкций. Цели представленной научной работы — проанализировать изменения и оценить возможную деградацию металла.

Материалы и методы. Итак, попытаемся дать количественную оценку изменений механических характеристик металла. Для этого рассмотрим одни и те же элементы конструкции до и после длительной эксплуатации. Такой мониторинг периодически проводится применительно к металлу магистральных трубопроводов. При этом можно даже прогнозировать остаточную долговечность материала [9, 10]. Однако для других металлоконструкций сложно реализовать такой подход. В этом случае можно воспользоваться информацией, полученной методом неразрушающего контроля металла. Обеспечение корректности таких данных предполагает, что:

– сопоставляются однотипные конструкции;
– контролируемые элементы сделаны из металла одного класса прочности;
– выборка обрабатываемых данных достаточно репрезентативна.

Авторы [11] утверждают, что класс прочности сталей для металлоконструкций определяется некоторыми интервалами пределов текучести, прочности и относительного удлинения. Значит, следует сравнивать металлы с механическими характеристиками, укладывающимися в эти интервалы. Например, для стали класса прочности С-285 предел текучести допускается в границах от 265 МПа до 285 МПа, т. е. определяется с погрешностью 7,55 %

Для диагностики действующих конструкций подходят только неразрушающие методы. Например, акустическую эмиссию задействуют для:

– нахождения дефектов в металле [12];
– контроля напряженного состояния [13];
– выявления роста усталостной трещины [14] в сосудах под давлением;
– определения начала активного растрескивания металла [15];
– контроля сварных соединений [16, 17].

При этом решаются вопросы оптимального расположения приборов для определения дефектов в конструкциях сложной формы [18].

С помощью электромагнитного контроля фиксируется заданная твердость металла [19]. Кроме того, применяются методы прямого механического взаимодействия с металлом при индентировании для оценки:

– остаточных напряжений в металле [20];

– начального значения предела текучести [21].

Механические характеристики достоверно описываются трехпараметрическим законом распределения Вейбулла[1]:

$$F(X) = 1 - exp\,[-(\,(X - C)/A)^{B}],$$

где X — величина механического свойства; C — параметр сдвига, определяющий минимально возможное значение характеристики; B — параметр формы, по которому можно судить о рассеивании этого свойства.

Очевидно, что в результате воздействия эксплуатационных нагрузок у материала могут изменяться средние, минимальные значения C механических характеристик. Как следствие, меняются среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации значений механических характеристик.

Примененный в статье метод индентирования основан на видоизмененном способе оценки твердости по Роквеллу. Конический индентор ударно (не статически) внедряется в отшлифованную испытуемую поверхность при условиях:

– энергия 0,16 Дж;

– угол при вершине 90º.

Затем анализируется реакция металла. Для работы достаточно 10 кв. см свободной площади металла [22–24] или сварного соединения [25]. Для реализации метода использовали аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и ноутбук. С помощью АЦП получили зависимости изменения скорости от времени внедрения конического индентора механической части. Затем сигнал программно обработали в ноутбуке и получили зависимости перемещения и ускорения индентора от времени. Далее взяли полученные из графиков промежуточные характеристики: глубина, максимальная и минимальная скорости, максимальное и минимальное ускорение внедрения конуса. Они стали объектом корреляционного анализа. Устанавливалась корреляция с механическими характеристиками, определенными по стандартным испытаниям на растяжение и твердость металла. В итоге изучения металлов различных классов прочности получили и зафиксировали универсальные корреляционные зависимости стандартных механических характеристик от промежуточных. Теперь при индентировании металла его стандартные механические характеристики в исследуемой точке почти сразу отображаются на дисплее ноутбука. Приборное обеспечение дает суммарное рассеивание, вызванное разбросом свойств в металле и погрешностью измерения. Предельные значения погрешности одного измерения — ±4 %. Возможность оперативно получить 10–20 значений на локальном участке металла нивелирует эту погрешность. А при оперативном получении неограниченного числа измерений обеспечивается высокая репрезентативность выборки. Перед каждым обследованием прибор тарируется:

– измеряется предел текучести на образцах с заранее известными свойствами, полученными при стандартных испытаниях на растяжение на разрывной машине ИР-200;

– затем выполняется регулировка.

Результаты исследования. Цель исследования заключалась в получении количественной сравнительной оценки возможной деградации металла в ходе длительной эксплуатации. Для этого неразрушающим методом индентирования фиксировались значения предела текучести стальных конструкций с нулевым и длительным сроком эксплуатации.

Так, рассматривались новые сооружения:

– складское помещение на ул. Луговой, 8 в Ростове-на-Дону (таблица 1);

– производственный корпус по ул. 1-й Пятилетки, 71 в Батайске (рис. 1);

– колонны трибун стадиона «Торпедо» в Таганроге (рис. 2).

Таблица 1

Данные обследования металлоконструкций склада на Луговой, 8 в Ростове-на-Дону

Значения предела текучести, МПа										
Ферма 12				Ферма 15				Ферма 18		
240	265	279	298	236	263	277	305	244	270	287
240	266	280	298	237	263	277	307	244	270	287
241	266	280	298	237	263	277	307	244	270	288

[1] ГОСТ Р 50779.27-2017 (МЭК 61649.2008). *Национальный стандарт Российской Федерации. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200146523 (дата обращения: 19.06.2023).

Значения предела текучести, МПа										
Ферма 12				Ферма 15				Ферма 18		
241	266	280	299	237	264	277	309	248	271	289
242	267	281	299	237	264	277	309	249	272	289
243	267	281	299	237	265	277	312	249	272	289
243	268	281	300	237	265	278	313	249	273	290
244	269	282	302	239	266	278	315	249	273	290
245	269	282	303	239	266	278	317	250	273	291
247	269	282	303	241	266	278	325	252	273	292
248	270	283	304	243	266	278	329	252	273	293
248	270	283	304	243	267	279	332	253	274	294
250	271	284	306	243	267	280	339	253	274	295
250	271	284	307	245	267	280	345	254	274	295
250	271	284	307	246	268	280	351	256	274	296
251	272	284	307	247	268	281		256	275	297
251	272	285	308	247	268	281		257	275	297
251	273	285	309	249	269	282		257	275	298
251	273	286	309	250	269	282		257	277	299
253	274	286	309	250	269	283		257	277	299
253	274	287	312	252	269	284		257	277	299
254	274	287	313	252	270	284		258	277	300
254	274	288	313	252	271	284		259	278	300
254	274	288	313	252	271	285		259	278	300
255	274	289	314	253	271	285		259	278	301
255	275	289	314	253	272	285		260	279	301
256	275	290	315	255	272	286		260	279	306
256	275	290	315	256	272	286		263	279	311
257	275	290	316	256	273	287		263	280	312
258	276	291	317	256	273	287		263	281	313
258	276	291	317	256	273	287		264	282	315
258	277	291	318	256	273	288		264	282	316
258	277	291	319	257	273	289		264	282	317
258	277	291	320	257	274	289		265	283	318
258	277	291	320	258	274	289		265	283	318
259	277	292	320	259	274	290		265	284	320
260	277	292	327	259	275	290		266	284	324
260	278	293	339	259	275	291		266	284	324
260	278	293	343	260	275	293		266	284	326
261	278	294	343	260	275	295		266	284	326
261	278	294	346	260	275	295		266	285	331
262	278	295	347	260	275	297		267	285	333
262	278	295	350	261	276	297		267	285	340
262	278	296	352	261	276	300		268	285	345
264	278	296	353	262	276	301		269	286	345
264	279	296	353	262	276	302		269	286	
264	279	297		262	276	302		270	286	

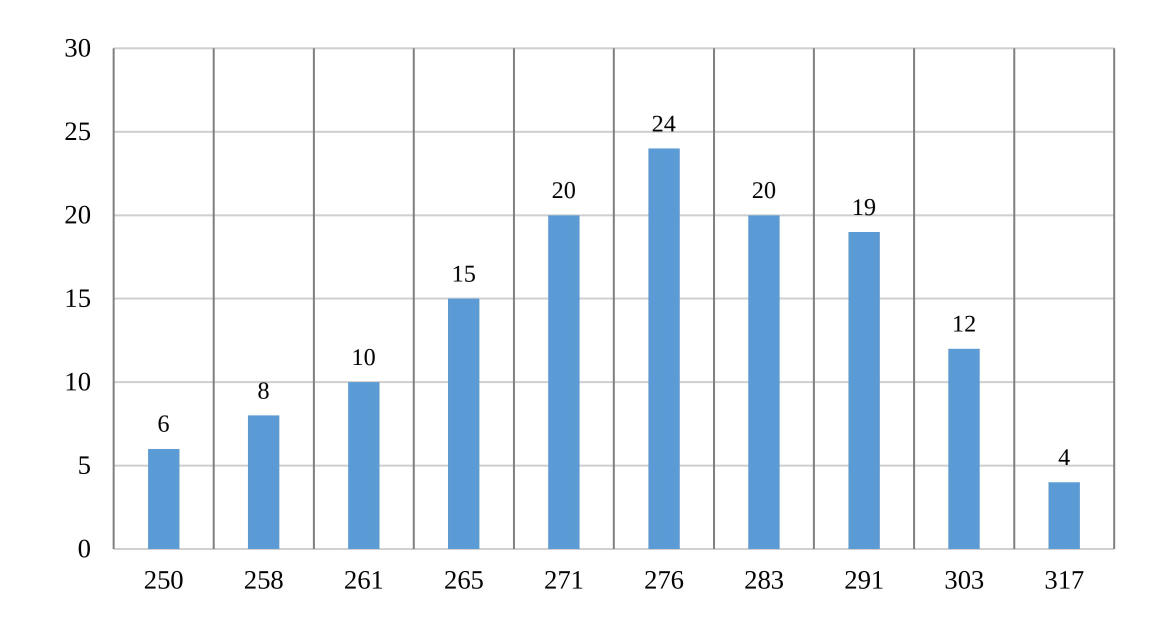


Рис. 1. Распределение значений предела текучести металла конструкций производственного корпуса в Батайске: σTmin = 246 МПа, σTср = 277 МПа, CV = 0,054

Здесь и далее указаны выборочные минимальные σт min, выборочные средние σт ср и коэффициенты вариации предела текучести CV. Ордината — шкала частоты значений. Цифры над столбцами — количество измеряемых значений в конкретном интервале.

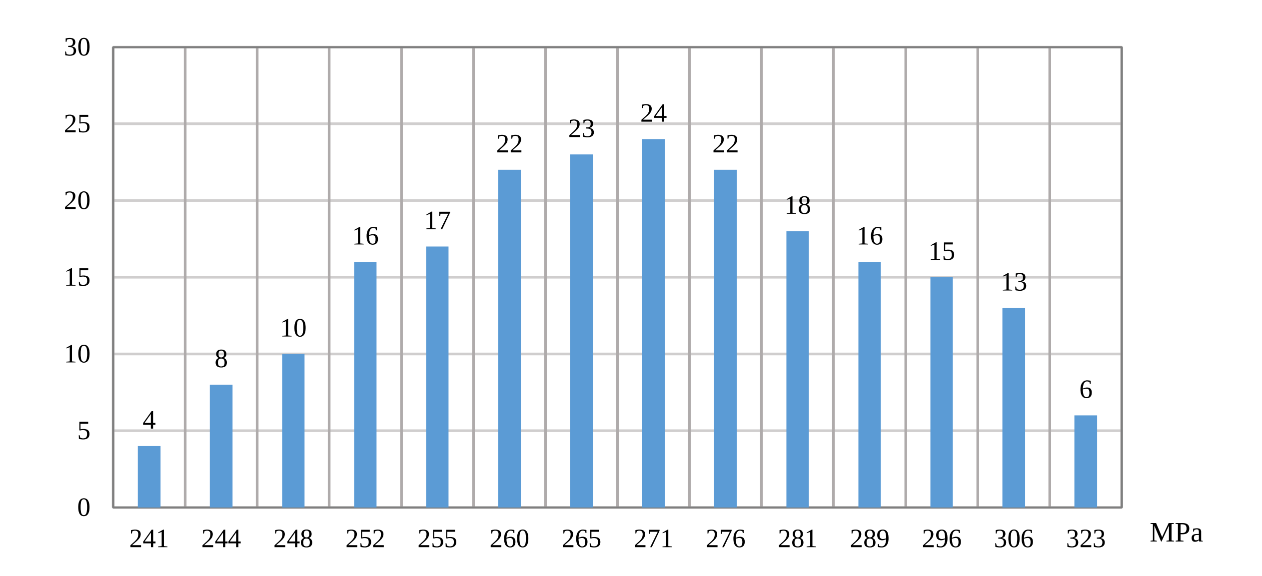


Рис. 2. Распределение значений предела текучести металла колонн стадиона «Торпедо» в Таганроге: σTmin = 240 МПа, σTср = 272 Мпа, CV = 0,068

Металл, бывший в эксплуатации несколько десятков лет, изучали по следующим объектам:

– железнодорожный мост на станции Лихая (65 лет, рис. 3);

– фермы покрытия Дворца спорта в Ростове-на-Дону (39 лет, рис. 4);

– растяжки несущих конструкций опор линии электропередач ВЛ 330 «Новочеркасская ГРЭС — Южная» (43 года, таблица 2).

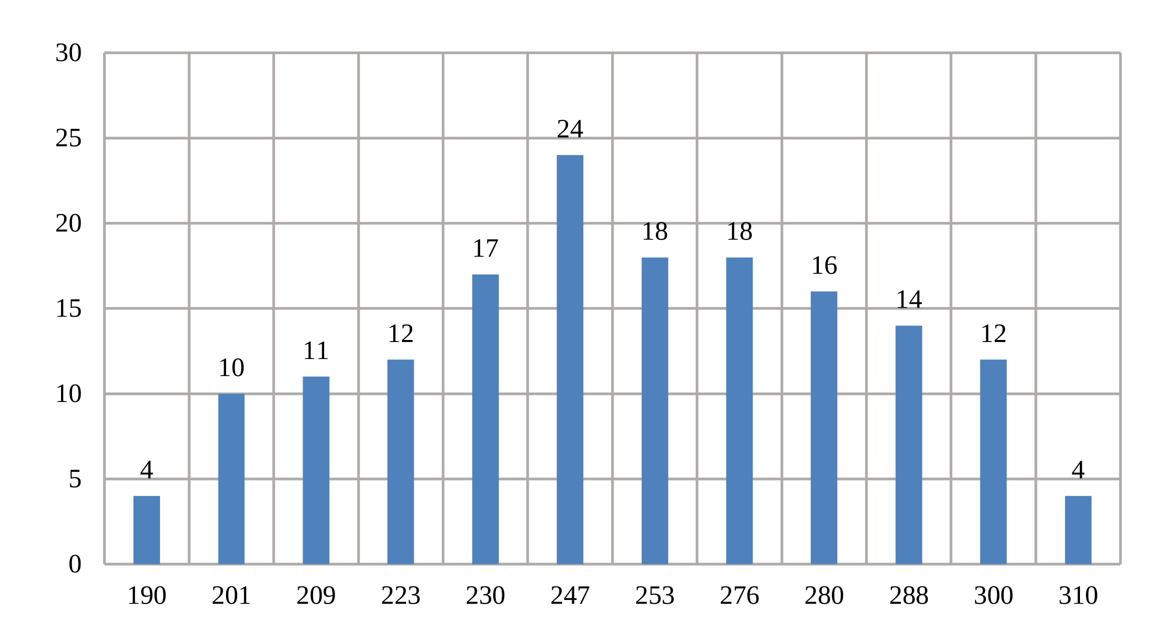


Рис. 3. Распределение значений предела текучести металла конструкций моста на ст. Лихая: σTmin = 188, σTср = 257, CV = 0,127

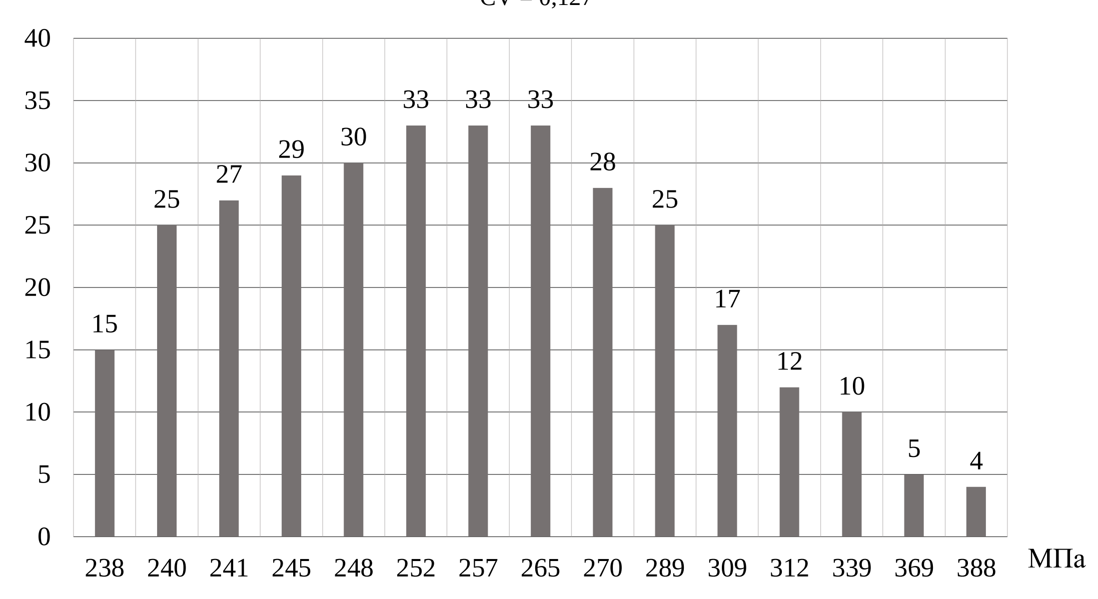


Рис. 4. Распределение значений предела текучести металла ферм покрытия Дворца спорта в Ростове-на-Дону: σTmin = 238 МПа, σTср = 263 МПа, CV = 0,11

Таблица 2

Результаты обследования растяжек опор ЛЭП ВЛ 330

Значения предела текучести, МПа							
235	244	249	259	275	282	288	357
236	245	251	261	278	282	291	357
237	246	255	263	280	282	292	366
238	246	256	265	280	283	294	380
239	247	256	269	281	284	295	380
239	248	259	272	282	286	303	384

Данные табл. 2 проверялись на соответствие трехпараметрическому закону распределения Вейбулла. Требовалось оценить теоретическое, а не выборочное минимальное значение предела текучести σт min. В результате расчета теоретическое оказалось меньше выборочного на 6 Мпа (229).

Отметим, что элементы новых конструкций не подвергались влиянию напряженно-деформированного состояния, а бывшие в эксплуатации длительное время находились в состоянии:

– сжато-изгибаемом (верхние пояса ферм покрытия);

– растянуто-изгибаемом (нижние пояса ферм покрытия);

– растянутом (растяжки).

Полученные в результате неразрушающего контроля значения предела текучести для лучшей информативности в таблице 2 и 3 ранжированы по возрастанию.

Стали всех новых металлоконструкций и ВЛ 330 можно отнести к классу прочности С285. У металла моста на станции Лихая среднее значение предела текучести на 8 МПа ниже указанной в [10] границы. У стали конструкций Дворца спорта — выше на 11 МПа.

Результаты сравнительного анализа приводятся в таблице 3 и на рис. 5.

Таблица 3

Сводные результаты исследований

Объект	Параметры					
	Значения предела текучести металла, МПа				Расчет среднего коэффициента вариации	
	Среднее σ_T		Минимальное в выборке $\sigma_{T min}$	Среднее $\sigma_{T min}$ по объектам	Среднеквадратичное отклонение (МПа) / CV	Среднее значение по объектам
Склад	276	274	236	239	23,7 / 0,085	0,069
Производственный корпус	277		246		14,5 / 0,054	
Стадион	272		240		18,5 / 0,068	
Дворец спорта	263	267	256	226	28,8 / 0,11	0,123
ЛЭП ВЛ 330	280		235		39,8 / 0,142	
Ж.-д. мост	257		188		33,5 / 0 ,127	

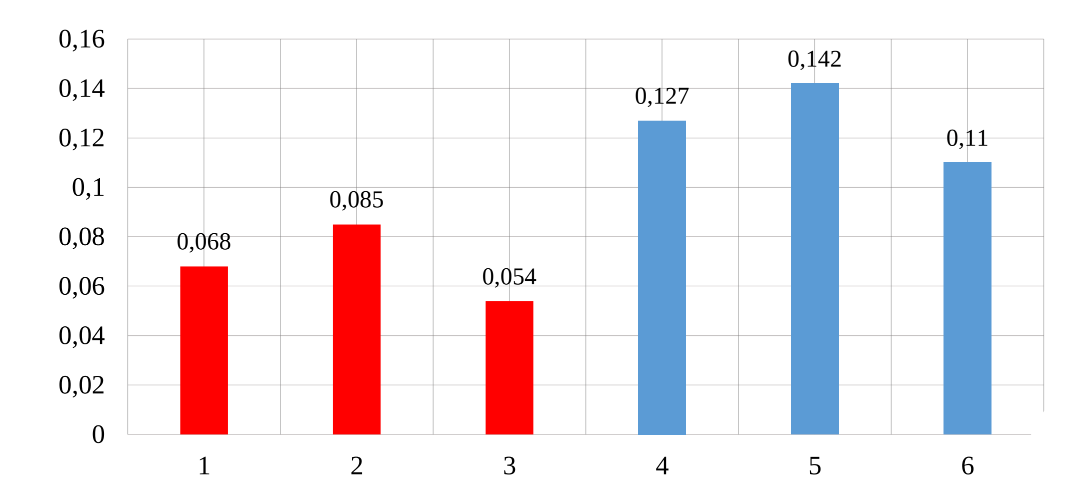


Рис. 5. Коэффициенты вариации предела текучести до и после длительной эксплуатации:
1 — стадион, 2 — склад, 3 — производственный корпус, 4 — ж.-д. мост, 5 — ЛЭП ВЛ 330,
6 — Дворец спорта

Обсуждение и заключение. Итак, сравним средние значения коэффициента вариации новых и бывших в эксплуатации конструкций. Из табл. 3 видно, что что после длительной эксплуатации этот показатель будет в среднем выше в 1,78 (во столько раз 0,123 больше, чем 0,069). Максимальный коэффициент вариации предела текучести (0,142) выявили на растяжках опор линии электропередач ВЛ 330 (43 года работы). Минимальное значение предела текучести (188 МПа) — у металла моста на ст. Лихая, бывшего в эксплуатации 65 лет.

Возможные теоретические минимальные значения предела текучести снижаются относительно выборочных, что может также увеличивать размах распределения и, соответственно, коэффициент вариации.

Для мониторинга прочностных возможностей (например, с целью ремонта или реконструкции) рекомендуется выборочно контролировать неразрушающим методом механические характеристики элементов металлоконструкции до и в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. Доценко Е.Р, Мындюк В.Д., Карпаш М.О. и др. Оценка изменений механических свойств металла магистральных трубопроводов с использованием методов неразрушающего контроля. В: *Труды VII междунар. науч.-тех. конф. по надежности и безопасности магистрального трубопроводного транспорта.* Новополоцк: ПГУ; 2011. С. 143–145. URL: https://www.psu.by/images/stories/nauka/tezis_7mntk.pdf (дата обращения: 28.05.2023).

2. Горынин И.В, Тимофеев Б.Т. Деградация свойств конструкционных материалов при длительном воздействии эксплуатационных температур. *Вопросы материаловедения.* 2011;(1(65)):41–59. URL: http://www.crism-prometey.ru/science/editions/Russian1(65)2011.pdf (дата обращения: 28.05.2023).

3. Демина Ю. *Влияние длительной эксплуатации и хранения на механические свойства и механизмы разрушения конструкционных материалов.* Автореф. дис. канд. тех. наук. Москва; 2014. 26 с.

4. Лубенский С.А., Ямников С.А. Влияние длительности эксплуатации на свойства металла труб магистральных трубопроводов. *Проблемы анализа риска.* 2013;10(1):58–63.

5. Быков И.Ю., Бирилло И.Н., Кузьбожев П.А. Исследование характеристик механических свойств металла труб газораспределительной станции после продолжительной эксплуатации. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2015;(2):86–91. https://doi.org/10.31660/0445-0108-2015-2-86-91

6. Большаков А.М. Анализ разрушения и дефектов в магистральных газопроводах и резервуарах Севера. *Газовая промышленность.* 2010;(5(646)):52–53.

7. Сыромятникова А.С. Деградация свойств металла труб при длительной эксплуатации в условиях низких климатических температур в составе магистральных газопроводов. *Вестник Томского государственного университета*. 2013;18(4-2):1746–1747.

8. Никифорчин Г.Н., Цирульник О.Т., Звирко О.И. и др. Оценка деградации физико-механических свойств сталей длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2013;79(9):48–55.

9. Aneesh Bangia, Raghu V. Prakash. Energy Parameter Correlation of Failure Life Data between Cyclic Ball Indentation and Low Cycle Fatigue. *Open Journal of Metal*. 2012;2(1):31–36. https://doi.org//10.4236/ojmetal.2012.21005

10. Collin M., Parenteau T., Mauvoisin G., Pilvin P. Material Parameters Identification Using Experimental Continuous Spherical Indentation for Cyclic Hardening. *Computational Materials Science*. 2009;46(2):333–338. https://doi.org//10.1016/j.commatsci.2009.03.016

11. Горев В.В., Уваров Б.Ю, Филиппов В.В. и др. *Металлические конструкции*. В 3 т. Т. 1. *Элементы стальных конструкций*. Москва: Высшая школа; 1997. 527 с.

12. Pullin R., Holford K.M., Lark R., Eaton M.J. Acoustic emission monitoring of bridge structures in the field and laboratory. *Journal of Acoustic Emission*. 2008;26:172–181.

13. Anastasopoulos A.A., Kourousis D.A., Cole P.T. Acoustic emission inspection of spherical metallic pressure vessels. In: *The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT (TINDT2008)*. Iran, Tehran; 2008. 10 p. URL: http://www.ndt.net/article/tindt2008/papers/177.pdf (дата обращения: 28.05.2023).

14. Pollock A. Probability of detection for acoustic emission. *Journal of acoustic emission*. 2007;25:231–237.

15. Polyzos D., Papacharalampopoulos A., Shiotani T., Aggelis D.G. Dependence of AE Parameters on the Propagation Distance. *Journal of acoustic emission*. 2011;29:57–67.

16. Gongtian Shen, Zhanwen Wu. Study on Spectrum of Acoustic Emission Signals of Bridge Crane. *Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2010;52(3):144–148. URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_08.pdf

17. Dirk Aljets, Alex Chong, Wilcox S.J., et al. Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array. *Journal of acoustic emission*. 2010;28:85–98.

18. Pullin R., Baxter M., Eaton M., Holford K.M., Evans S. Novel acoustic emission source location. *Journal of acoustic emission*. 2007;25:215–223.

19. Wilson J.W., Liu Jun, Karimian N., Davis C.L., Peyton A.J. Assessment of microstructural changes in Grade 91 power station tubes through permeability and magnetic Barkhausen noise measurements. In: *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*. Czech Republic, Prague; 2014. URL:

https://research.manchester.ac.uk/en/publications/assessment-of-microstructural-changes-in-grade-91-power-station-t (дата обращения: 28.05.2023).

20. Hongping Jin, Wenyu Yang, Lin Yan. Determination of residual stresses and material properties by an energy-based method using artificial neural networks. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 2012;61(4):296–305. https://doi.org//10.3176/proc.2012.4.04

21. Clausnera A., Richterb F. Fundamental limitations at the determination of initial yield stress using nano-indentation with spherical tips. *European Journal of Mechanics*. 2016;58:69–75. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.01.009

22. Беленький Д.М., Недбайло А.А. *Способ определения механических характеристик и физического критерия подобия прочности материала детали.* Патент РФ, № 2279657. 2006. 12 с. URL: http://allpatents.ru/patent/2279657.html (дата обращения: 28.05.2023).

23. Бескопыльный А.Н, Веремеенко А.А., Вернези Н.Л. *Программа для ЭВМ № 2015610650 Вектор 2015*. Свидетельство РФ о государственной регистрации, № 2014661747. 2015. URL: https://onlinepatent.ru/software/2015610650/ (дата обращения: 28.05.2023).

24. Вернези Н.Л., Веремеенко А.А., Вальдман Д.С. Исследование прочностных характеристик металлического крепежа деревянного корпуса речного причала. *Инженерный вестник Дона*. 2015;(3). URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3231(дата обращения: 28.05.2023).

25. Belen'kii D.M., Vernezi N.L., Cherpakov A.V. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. *Welding International*. 2004;18(3):213–215. https://doi.org/10.1533/wint.2004.3268

References

1. Dotsenko ER, Myndyuk VD, Karpash MO. Otsenka izmenenii mekhanicheskikh svoistv metalla magistral'nykh truboprovodov s ispol'zovaniem metodov nerazrushayushchego kontrolya. In: *Trudy VII mezhdunar. nauch.-tekh. konf. po nadezhnosti i bezopasnosti magistral'nogo truboprovodnogo transporta*. Novopolotsk: 2011. P. 143–145. URL: https://www.psu.by/images/stories/nauka/tezis_7mntk.pdf

2. Gorynin IV, Timofeev BT. Degradation of properties of structural materials at long time influence of operational temperatures. *Voprosy Materialovedeniya.* 2011; (1(65)):41–59.

3. Demina Yu. *Vliyanie dlitel'noi ekspluatatsii i khraneniya na mekhanicheskie svoistva i mekhanizmy razrusheniya konstruktsionnykh materialov*. Avtoref. dis. kand. tekh. nauk. Moscow; 2014. 26 p.

4. Lubenskii SA, Yamnikov SA. Vliyanie dlitel'nosti ekspluatatsii na svoistva metalla trub magistral'nykh truboprovodov. *Issues of risk analysis.* 2013;10(1):58–63.

5. Bykov IYu, Birillo IN, Kuzbozhev PA. Study of characteristics of mechanical properties of gas-distributing station pipes metal after long-term operation. *Oil and Gas Studies.* 2015;(2):86–91. https://doi.org/10.31660/0445-0108-2015-2-86-91

6. Bolshakov AM. Analiz razrusheniya i defektov v magistral'nykh gazoprovodakh i rezervuarakh Severa. *Gas Industry*. 2010;(5(646)):52–53.

7. Syromyatnikova AS. Degradation of physical and mechanical condition of gas pipeline metal during long operation at low climatic temperatures. *Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences*. 2013;18(4-2):1746–1747.

8. Nikiforchin GN, Tsirul'nik OT, Zvirko OI, Gredil' MI, Voloshin VA. Degradation of the physical and mechanical properties of steels in long-run gas pipelines. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2013;79(9):48–55.

9. Aneesh Bangia, Raghu V Prakash. Energy Parameter Correlation of Failure Life Data between Cyclic Ball Indentation and Low Cycle Fatigue. *Open Journal of Metal*. 2012;2(1):31–36. https://doi.org//10.4236/ojmetal.2012.21005

10. Collin M, Parenteau T, Mauvoisin G, Pilvin P. Material Parameters Identification Using Experimental Continuous Spherical Indentation for Cyclic Hardening. *Computational Materials Science*. 2009;46(2):333–338. https://doi.org//10.1016/j.commatsci.2009.03.016

11. Gorev VV, Uvarov BYu, Filippov VV, Belyi GI, Endzhievskii LV, Krylov II, et al. *Metallicheskie konstruktsii.* In 3 vol. Vol. 1. *Elementy stal'nykh konstruktsii*. Moscow: Vysshaya shkola; 1997. 527 p.

12. Pullin R, Holford KM, Lark R, Eaton MJ. Acoustic emission monitoring of bridge structures in the field and laboratory. *Journal of Acoustic Emission*. 2008;26:172–181.

13. Anastasopoulos AA, Kourousis DA, Cole PT. Acoustic emission inspection of spherical metallic pressure vessels. In: *The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT (TINDT2008)*. Iran, Tehran; 2008. 10 p. URL: http://www.ndt.net/article/tindt2008/papers/177.pdf (дата обращения: 28.05.2023).

14. Pollock, A. Probability of detection for acoustic emission. *Journal of acoustic emission*. 2007;25:231–237.

15. Polyzos D, Papacharalampopoulos A, Shiotani T, Aggelis DG. Dependence of AE Parameters on the Propagation Distance. *Journal of acoustic emission*. 2011;29:57–67.

16. Gongtian Shen, Zhanwen Wu. Study on Spectrum of Acoustic Emission Signals of Bridge Crane. *Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2010;52(3):144–148. URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_08.pdf

17. Dirk Aljets, Alex Chong, Wilcox SJ, et al. Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array. *Journal of acoustic emission*. 2010;28:85–98.

18. Pullin R, Baxter M, Eaton M, Holford KM, Evans S. Novel acoustic emission source location. *Journal of acoustic emission*. 2007;25:215–223.

19. Wilson JW, Liu Jun, Karimian N, Davis CL, Peyton AJ. Assessment of microstructural changes in Grade 91 power station tubes through permeability and magnetic Barkhausen noise measurements. In: *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*. Czech Republic, Prague; 2014. URL: https://research.manchester.ac.uk/en/publications/assessment-of-microstructural-changes-in-grade-91-power-station-t

20. Hongping Jin, Wenyu Yang, Lin Yan. Determination of residual stresses and material properties by an energy-based method using artificial neural networks. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 2012;61(4):296–305. https://doi.org//10.3176/proc.2012.4.04

21. Clausnera A, Richterb F. Fundamental limitations at the determination of initial yield stress using nano-indentation with spherical tips. *European Journal of Mechanics*. 2016;58:69–75. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.01.009

22. Belenkii DM, Nedbailo AA. *Sposob opredeleniya mekhanicheskikh kharakteristik i fizicheskogo kriteriya podobiya prochnosti materiala detali.* Patent RF, No. 2279657. 2006. 12 p. URL: http://allpatents.ru/patent/2279657.html

23. Beskopylnyi AN, Veremeenko AA, Vernezi NL. *Programma dlya EVM № 2015610650 Vektor 2015*. Certificate of the Russian Federation on state registration, No. 2014661747. 2015. URL: https://onlinepatent.ru/software/2015610650/

24. Vernezi NL, Veremeenko AA, Valdman DS. Research of strength characteristics of metal fixture of the wooden case of the river mooring. *Engineering journal of Don*. 2015;(3). URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3231

25. Belen'kii DM, Vernezi NL, Cherpakov AV. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. *Welding International*. 2004;18(3):213–215. https://doi.org/10.1533/wint.2004.3268

Поступила в редакцию 26.06.2023
Поступила после рецензирования 13.07.2023
Принята к публикации 17.07.2023

Об авторе:

Вернези Никос Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), AuthorID, ORCID, vernezin@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Received 26.06.2023
Revised 13.07.2023
Accepted 17.07.2023

About the Author:

Nikas L. Vernezi, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), AuthorID, ORCID, vernezin@mail.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.